

面向可再生能源的微电网电能质量特点分析 与综合评价方法研究

曾君¹, 徐冬冬¹, 郭华芳², 李晨迪¹, 刘俊峰¹

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院广州能源研究所集成技术研发中心, 广东 广州 510640)

摘要: 微电网已成为智能电网建设中的重要组成部分, 是可再生能源等分布式电源接入电网的有效方式。微电网电能质量客观科学的综合评价对于微电网的运营建设具有重要的现实意义和指导价值。基于微电网中电能质量的特点进行分析, 提出了一种新的适合于微电网电能质量的评价方法。首先, 从电压指标、电流指标和频率指标, 结合对比大电网, 对微电网电能质量各单项指标进行了详细阐述, 指出其特点, 并根据相关标准, 确定电能质量各单项指标阈值。进一步, 借鉴模糊评价思想, 根据电能质量指标特点, 采用柯西分布, 提出了一种最优隶属度方法, 并结合 G1 层次分析法确定指标主观权重, 结合客观权重得到各指标的综合权重后进行综合评价, 得到量化的微电网电能质量综合评价结果。最后, 采用一组数据进行测试, 并和其他方法进行对比分析, 验证了所提出的方法的有效性。

关键词: 微电网; 电能质量; 综合评价; 最优隶属度

Renewable energy-oriented micro-grid power quality characteristic analysis and comprehensive evaluation

ZENG Jun¹, XU Dongdong¹, GUO Huafang², LI Chendi¹, LIU Junfeng¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences Integrated Technology Research Center, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Micro-grid has already been an essential part of smart grid. It is an effective way to connect distributed generation such as renewable energy to power grid. It is most important to evaluate the power quality objectively and professionally for the micro-grid. Based on analyzing the characteristics of micro-grid power quality, this paper proposes a new power quality evaluation method suitable for micro-grid. First of all, from the perspective of voltage, current and frequency, compared with traditional power grid, every index of micro-grid power quality is analyzed in detail and the characteristics of indexes are pointed out. According to some relative standards, all power quality indexes' thresholds are ensured. Further, based on fuzzy evaluation method, Cauchy distribution membership function is adopted to determine all indexes' membership belong to the optimization. Indexes' subjective weights are defined by G1 method. Combined with the subjective and objective weights, the synthetic weights are got and used for comprehensive evaluation. And a quantitative micro-grid power quality evaluation result is obtained. Finally, simulation is applied by a given set of data from micro-grid. Simulation results prove that the proposed method is accurate and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61573155) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of South China University of Technology (No. 2015zm008 and No. 2015zz097).

Key words: micro-grid; power quality; comprehensive evaluation; optimal membership

0 引言

能源是社会经济发展的动力。到现阶段, 能源危机、环境污染和生态恶化已是人类面临的三大主

要问题。大力发展可再生能源为解决能源与环境之间的矛盾提供了一条可行和必行之路。根据可再生能源的时空分布特性, 配备一定的传统能源与储能系统, 就近形成微电网, 可以大大地解决分散电力的需求, 减少电力新建或升级输、配电网的费用, 是可再生能源利用的一条有效途径。

对于微电网的研究, 目前主要集中在规划设计、

基金项目: 国家自然科学基金(61573155); 华南理工大学中央高校基本科研业务费(2015zm008, 2015zz097)

运行优化、保护控制、仿真实验等技术^[1-2]。微电网的电能质量的研究则刚刚引起重视。正如智能电网对“自愈、互动、优质、兼容、经济”的追求,微电网终极目标亦是“自治、开放、灵活、优质和经济”,微电网的电能质量问题研究至关重要,关键在于:

第一,从微电网本身来讲,与传统电网相比,它由分布式电源、储能设备、能量转换装置、监控和保护装置以及负荷等汇集而成,既可与大电网并网运行亦可孤岛自治运行^[3-4]。相比较于大电网,微电网的电能质量有它自己的新特点。

第二,定性并且定量地建立微电网运行的评价指标体系对于微电网建设、运行、评估以及决策都具有重要意义。而微电网的电能质量是评价指标体系的重要内容。

第三,微电网运行时,优化与协调控制是关键^[5]。而这个优化与协调控制的过程实际上是一个既包含连续运行又具有离散决策的混杂过程。寻求激发系统从连续运行到离散决策动态演化机制是建立合适的优化与协调控制策略的基础。电能质量的好坏是激发系统实时优化与协调的重要指标。

此外,在未来电力市场背景情况下,微网的渗透率逐步提高,必然会走上“按质定价”的道路,电能质量的优劣将直接影响其经济效益,并决定其是否能并网。因此,微电网电能质量的研究对微电网的发展具有重要的意义与价值。

本文在介绍微电网基本结构的基础上,综述了目前微电网电能质量的研究现状,阐述并总结了微电网电能质量的特点。以此为基础,借鉴模糊综合评价思想,提出了一种新的基于最优隶属度的微电网电能质量综合评价方法,并通过仿真实验验证了该评价方法的有效性。

1 微电网结构及电能质量特点分析

微电网的典型结构如图1所示。微电网中包含有多个分布式电源(Distributed Generation, DG)和储能系统,联合向负荷供电。整个微电网作为一个整体,通过开关与大电网相联。该微电网分布式电源部分由可再生能源(光伏阵列、风力发电机为主)、柴油发电机(后备电源),储能设备(主要采用蓄电池、超级电容)以及负荷(根据其重要程度,分为不可中断负荷和可中断负荷)。

从图1可以看出,微电网的特点是:(1)通过隔离变压器、隔离装置与大电网相连。可以并网运行亦可孤网独立运行,当电力不足时可切除非重要负荷,保证不可中断负荷的电力供应。(2)内部绝大部分DG都采用电力电子变换器与母线和负荷相联。

(3)这样的结构加上系统的动态随机性和分散性,决定了微电网的特殊网络性质和运行特点,决定了其电能质量相比于大电网来说,具有其许多新的特点。

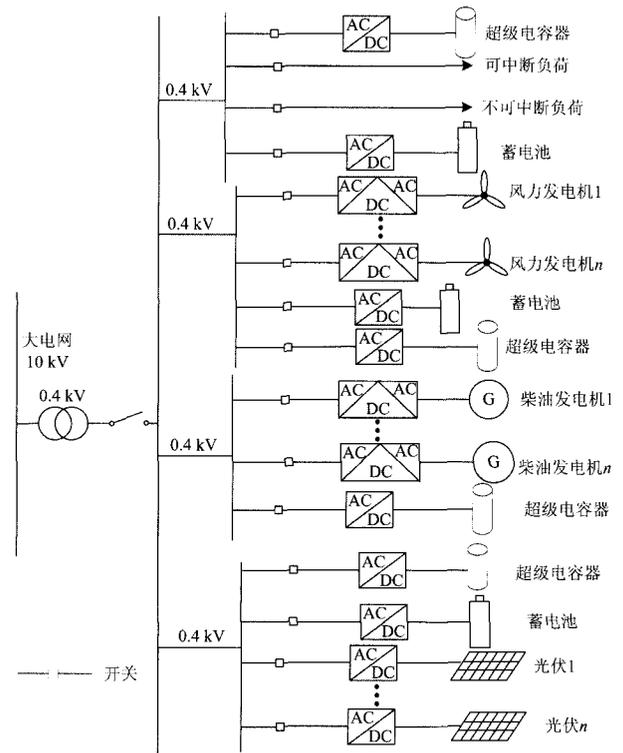


图1 微电网结构示意图

Fig. 1 Micro-grid structure diagram

借鉴大电网电能质量标准和评价体系,对比列出大电网和微电网的电能质量指标特点,如表1所示。而目前和微电网相关的电能质量标准,主要是国家电能质量标准、分布式电源并网标准和配电网相关标准等。结合表1和各项标准,综合分析。

第一,对于微电网来说,表1中各指标最重要的是电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、电压谐波和频率偏差等六项指标。而分布式电源的直流电流分量和电流谐波大小在允许接入电网的范围内即可,不需要将其作为电能质量检测内容。

第二,本文取各单项指标的合格限值如下:

(1) 频率偏差。小容量电力系统(300 MW 以下)的正常频率偏差不得超过 ± 0.5 Hz,冲击负荷引起的系统频率偏差变化为 ± 0.2 Hz。

(2) 电压偏差。20 kV 及以下三相公共连接点的电压偏差不超过标称电压的 $\pm 7\%$; 220 V 单相公共连接点电压偏差不超过标称电压的 $+7\%$, -10% 。

(3) 电压波动。对 35 kV 及以下中低压系统,公共连接点处的电压波动限值 $d(\%)$ 与电压波动频度 $r(\text{次/h})$ 有关。当 $r \leq 1$ 时, $d=4$; 当 $1 < r \leq 10$ 时, $d=3$;

当 $10 < r \leq 100$ 时, 限值 $d=2$; 当 $100 < r \leq 1000$ 时, 限值 $d=1.25$ 。

表 1 微电网和大电网电能质量特点

Table 1 Power quality characteristics of micro-grid and power grid

指标类型	大电网特点	微电网特点
电压偏差	大电网电压偏差出现较大的时刻是负荷低谷时刻, 其他情况下, 通过对系统中无功补偿设备进行控制, 使得无功平衡, 电压偏差较小。	微电网中无功调节能力较差, 考虑到成本和技术因素, 分布式电源的功率因数也只能在 0.98(超前)~0.98(滞后)之间 ^[6] , 无功调节手段较为有限。
	大电网中发电设备运行状态较为稳定, 电压波动和闪变由于负荷的功率变动引起。功率变动相比于系统容量较小, 因此电压波动与闪变程度较轻。	微电网中分布式电源具有间歇性且投切较为频繁, 会引起电压波动与闪变, 在负荷和分布式电源的共同作用下, 电压波动与闪变问题会加重。另外, 储能或者无功补偿不足也容易引起电压波动与闪变。
	大电网中最主要的负载是三相电动机, 单相负荷占总负荷比重较小, 因此三相不平衡问题较轻。	微电网中单相负荷占总负荷的比重较大, 并可能存在单相电源, 如果控制不当, 在两者共同作用下, 三相不平衡现象较严重。另外, 大电网三相不平衡会渗透到微电网。
	大电网中谐波主要由于非线性负荷引起。	微电网中谐波主要是由非线性负荷和变流器引起。大电网电压谐波也会渗透到微电网。
电流分量	大电网中基本不会出现直流电流分量问题。	分布式电源不经过变压器直接和微电网相连, 变流器交正负半周不对称会产生直流分量。
	大电网电流谐波主要由非线性负荷引起。	微电网电流谐波是变流器和非线性负荷共同作用引起。
频率偏差	容量大, 冲击负荷造成频率偏差较小, 出现频率偏差时可以通过发电机的余量和主调频厂进行调频。	容量小, 冲击负荷易造成频率偏差。分布式电源可调节余量较小时, 也易出现频率偏差。另外, 并网微电网和大电网进行功率交换时出现波动也会造成频率偏差。储能装置是微电网的重要调频手段。

(4) 闪变: 对 35 kV 及以下中低压系统, 分布式电源连接的公共连接点处的闪变限值 $k(\%)$ 与闪变频度 $r(\text{次}/\text{min})$ 有关。当 $r < 10$ 时, $k=0.4$; 当 $10 \leq r \leq 200$ 时, $k=0.2$; 当 $r > 200$ 时, $k=0.1$ 。对低压系统, 分布式电源和负荷直接相连接的情形下, 负荷的短时间闪变限值 $k=0.35$, 长时间闪变限值 $k=0.25$ 。

(5) 谐波。对标称电压为 0.38 kV 电网, 电压总谐波畸变率不得超过 5%, 奇次谐波不得超过 4%, 偶次谐波不得超过 2%。

(6) 三相不平衡。公共连接点的三相电压不平衡度不应超过 2%, 短时不超过 4%; 其中由各分布式电源引起的公共连接点三相电压不平衡度不应超过 1.3%, 短时不超过 2.6%。

2 微电网电能质量综合评价方法

目前, 对于电能质量的综合评估方法主要有神经网络法^[7], 投影寻踪法^[8], 理想解法^[9], 密切值法^[10], 概率统计与矢量代数法^[11], 标准样本评估误差最小法^[12]和模糊数学法。其中, 对于神经网络法和投影寻踪法, 合适、准确有效样本的选取对评价的有效性具有非常重要的影响, 而目前电网合格与不合格数据的多样性难以全面获取, 这将直接影响评价模型的有效性。理想解法在遇到贴近期相等时不能区分样本之间优劣性。密切值法适用于多测点、多指标的评价系统, 但是当评估方案变化时, 评估结果可能出现“逆序”。概率统计与矢量代数法仅能够对长期电能质量状况进行评价。目前应用最为广泛的当属模糊数学法^[13-15], 但其模糊化结果不能定量地给出评价结果, 并且存在一定的误判率。而且, 目前很少见专门针对微电网的电能质量特点的研究。正是基于此, 本文针对微电网特点, 借鉴传统的模糊综合评价方法的思想, 考虑到电能质量的特点, 是相对于标准值的偏差越小越好, 采用柯西分布, 提出了一种新的最优隶属度方法, 实现了对微电网电能质量有效的量化综合评价。

2.1 基于最优隶属度的综合评价方法

借鉴模糊综合评价思想, 基于最优隶属度的综合评价, 关键在于:

(1) 评价指标的确定。按照前文分析, 本文选取电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、电压谐波和频率偏差等六项指标。

(2) 隶属函数的建立, 对每个指标进行最优识别;

(3) 确定各单项指标的权重, 采用合适的加权方法进行综合评判。关键在于如何减少主观因素的影响以及一致性检验。

本文所提出的基于最优隶属度的模糊综合评价流程关键步骤如下:

(1) 根据上传信息, 确定监测点频率偏差类型、电压类型、电压波动与闪变频度、三相不平衡类型等, 从而确定各指标的限值。

(2) 隶属函数的建立, 有效反应合格度, 直观,

即便对于不合格区域也能有效评价, 并且能快速还原不合格原因。

(3) 存在单项指标不合格, 直接判断为不合格, 并以最小的隶属度值作为最终评价结果。

(4) 权重确定, 主客观结合, 减少主观影响。其中, 客观权重设定原则: 采用木桶理论, 对每个指标, 隶属度越小, 则客观权重越大。再应用 G1 法确定主观权重。对主观权重和客观权重进行综合得到综合权重。

2.2 微电网电能质量综合评价实现

为了准确判断电能质量是否合格, 本文对评价作如下规定:

(1) 按照[0, 1]来定量给出电能质量评价结果, 其中 1 为最优, 0 为最差, 0.5 为合格的阈值;

(2) 当存在指标不合格时, 对应的隶属度在 [0, 0.5), 综合评价结果在 [0, 0.5);

(3) 当所有指标均合格时, 那么各单项指标的隶属度均在 [0.5, 1], 综合评价结果在 [0.5, 1]。

2.2.1 隶属函数的确定

针对电能质量指标特点, 本文提出最优隶属度法, 关键在于只计算分项指标属于最优(偏差为零)的隶属度。采用柯西分布建立各指标的隶属度函数, 可以满足上述规定。柯西分布如式(1)所示。

$$\lambda_i = 1 / (1 + \alpha_i \cdot x_i^{\beta_i}) \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

式中: λ_i 为指标 i 的隶属度; x_i 为指标 i 偏差量的绝对值; α_i 和 β_i 分别为指标 i 对应的常数。

以电压偏差为例, 确定隶属度函数时, 计算电压偏差在 [0, 100%] 时对应的隶属度, 以调整 α 和 β 的大小。将电压偏差指标限值(此处按 0.38 kV 三相公共连接点情况, 取值 7%)代入式(1), 通过试凑法, 取 $\alpha = 0.0595$, $\beta = 1.4500$ 。此时电压偏差的隶属度如表 2 所示, 隶属函数曲线如图 2 所示。

2.2.2 指标权重确定

指标权重的选取直接影响综合评价的结果。采用主观权重与客观权重相结合, 可以兼顾对各指标权重的感知, 减小人为因素的影响。

(1) 利用 G1 法确定指标主观权重

G1 法是一种针对层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)进行改进的一种方法^[16], 与 AHP 法相比, 其计算量比 AHP 法大幅减小, 提高了计算速度, 而且无需构造判断矩阵, 不需一致性检验。

G1 法的步骤为: 1) 选出最重要的指标; 2) 从余下指标中再选出最重要的指标; 3) 依次类推; 4) 确定相邻指标之间的相对重要程度 r_k 。 r_k 的取值参考表 3。

表 2 电压偏差对应的隶属度

电压偏差/%	0	0.5	1	1.5	2
隶属度	1.000 0	0.978 7	0.943 8	0.903 2	0.860 1
电压偏差/%	2.5	3	5	7	10
隶属度	0.816 5	0.773 6	0.619 6	0.500 0	0.373 5
电压偏差/%	15	20	30	40	50
隶属度	0.248 8	0.179 1	0.108 1	0.074 0	0.054 6
电压偏差/%	60	70	80	90	100
隶属度	0.042 5	0.034 3	0.028 4	0.024 1	0.020 7

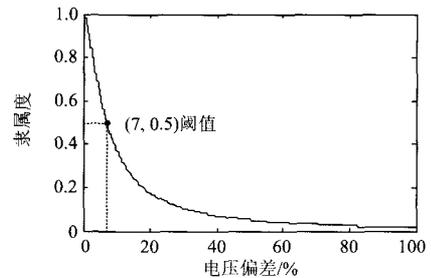


图 2 隶属度函数曲线

Fig. 2 Membership function curve

表 3 指标权重比例形成原则

重要程度 r_k	定义
1.0	指标 I_{k-1} 与指标 I_k 同样重要
1.2	指标 I_{k-1} 比指标 I_k 稍微重要
1.4	指标 I_{k-1} 比指标 I_k 明显重要
1.6	指标 I_{k-1} 比指标 I_k 强烈重要
1.8	指标 I_{k-1} 比指标 I_k 极端重要

按照前文分析, 对电能质量的六个指标排序: 频率偏差 > 谐波畸变 > 电压波动 > 闪变 > 电压偏差 > 三相不平衡, 取相对性重要程度依次为 1.2, 1.2, 1, 1.2, 1.8^[15,17]。对指标权重进行归一化, 得到各指标权重如表 4 所示。

表 4 各指标主观权重

指标名称	权重
电压偏差 w_1	0.140 4
电压波动 w_2	0.168 5
闪变 w_3	0.168 5
谐波 w_4	0.202 1
不平衡度 w_5	0.078 0
频率偏差 w_6	0.242 5

指标主观权重重要性分析:

① 频率出现偏差时, 设备的运行效率会发生显著变化, 偏差超出一定范围时直接影响微电网运行

的稳定性,因此频率偏差指标最重要。

② 当系统中出现电压谐波时,会在输电线路和负荷产生严重的附加损耗,并且可能出现谐振过电压,加速绝缘老化威胁设备运行安全,因此谐波指标较重要。

③ 电压波动为一系列电压变动或连续的电压偏差。闪变则除了电压波动外,还考察人对闪变的视觉感受。电压波动与闪变一般只会短时间影响设备性能,危害程度较轻。故电压波动与闪变指标类似,重要性程度一般。

④ 电压过高或过低主要是对设备运行效率造成影响,不危害运行安全,重要性程度较低。

⑤ 只要存在单相负荷,出现三相不平衡就是难以避免的,不超过限值对系统安全和设备运行状态就不会造成太大影响。

(2) 客观权重的确定

本文定义客观权重为

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i} / \sum_{k=1}^6 \frac{1}{\lambda_k} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

式中: v_i 为指标 i 客观权重; λ_i 为指标 i 隶属度。显然,隶属度 λ_i 越小,指标 i 客观权重 v_i 越大。

(3) 综合权重

权重常见的合成方法有: \vee (取大)、 \wedge (取小)、 $+$ (加)和 \times (乘)。本文采用 \times ,避免权重组合时 \vee 和 \wedge 忽略其中一个权重,或者 $+$ 不能够体现很小的权重的缺点。故综合权重的计算表达式为^[18]

$$\xi_i = \frac{w_i v_i}{\sum_{j=1}^6 w_j v_j} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (3)$$

式中: w_i 为指标 i 的主观权重; v_i 为指标 i 客观权重; ξ_i 为指标 i 的综合权重。

2.2.3 综合评价

令: 隶属度向量为 A , $A=[\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \lambda_5 \lambda_6]$, 取 $\lambda_{\min} = \min\{\lambda_i\}$, ($i=1, 2, \dots, 6$)。综合权重向量为 Δ , $\Delta=[\xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \xi_6]$ 。

最终评价结果为 σ , 若 $\lambda_{\min} < 0.5$, $\sigma = \lambda_{\min}$; 若 $\lambda_{\min} \geq 0.5$, $\sigma = \Delta \cdot A^T$ 。

3 仿真实验和结果分析

3.1 场景模拟

取一组某微电网电能质量监测数据,如表5所示。 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 为4个监测点; x_1 为电压偏差; x_2 为电压波动; x_3 为电压闪变; x_4 为谐波; x_5 为不平衡度; x_6 为频率偏差。

表5 评价数据

Table 5 Evaluation data

	$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/\%$	$x_4/\%$	$x_5/\%$	$x_6/\%$
Q_1	6.53	0.086	0.350	3.33	1.85	1.21
Q_2	2.36	1.137	0.177	1.78	0.77	0.25
Q_3	4.01	2.251	0.250	5.26	2.35	0.53
Q_4	3.37	1.789	0.101	4.48	1.01	0.88

考虑以下三种不同的情况,对电能质量进行评价。

情况A: 0.38 kV 三相公共连接点,电压波动频率为20次/h,电压闪变频率为5次/min,非分布式电源引起的正常不平衡度,正常频率偏差;

情况B: 0.38 kV 三相公共连接点,电压波动频率为5次/h,电压闪变频率为13次/min,分布式电源引起的短时不平衡度,冲击频率偏差;

情况C: 6 kV 三相公共连接点,电压波动频率为5次/h,电压闪变频率为5次/min,非分布式电源引起的短时不平衡度,正常频率偏差。

评价步骤如下:

① 以情形A的 Q_2 监测点为例,确定各指标的合格阈值矩阵 $[7\%, 2\%, 0.4\%, 5\%, 2\%, 1\%]$,隶属度函数对应的 α 矩阵 $[0.059\ 5, 0.036\ 60, 3.775\ 8, 0.096\ 9, 0.360\ 0, 1.000]$ 和 β 矩阵 $[1.45, 1.45, 1.45, 1.45, 1.45, 1.45]$ 。

② 计算 Q_2 点隶属度,得到 $A=[0.828\ 7, 0.694, 0.765\ 3, 0.817\ 2, 0.799\ 6, 0.881\ 9]$, $\lambda_{\min} = \min\{A(i)\} = 0.694\ 0 > 0.5$,故继续。若 $\lambda_{\min} < 0.5$,则最终评价结果 $\sigma = \lambda_{\min}$ 。

③ 计算客观权重,并求出综合权重。根据式(2)确定的客观权重为: $V=[0.159\ 6, 0.190\ 5, 0.172\ 8, 0.161\ 8, 0.165\ 4, 0.149\ 9]$,根据式(3),结合主观权重: $W=[0.140\ 4, 0.168\ 5, 0.168\ 5, 0.202\ 1, 0.078\ 0, 0.242\ 5]$,计算出综合权重: $\Delta=[0.135\ 3, 0.193\ 9, 0.175\ 8, 0.197\ 5, 0.077\ 9, 0.219\ 6]$ 。

④ 得到综合评价结果。 Q_2 点的综合评价结果 $\sigma = \Delta \cdot A^T = 0.798\ 6$ 。

⑤ 重复①、②、③、④得出所有监测点在不同情况下的评价结果。

3.2 结果及分析

用最优隶属度法对表5中4个监测点在三种情形下的电能质量进行评价。评价结果如表6所示。

排序: $Q_{2B} > Q_{2C} > Q_{2A} > Q_{4B} > Q_{1B} > Q_{4A} > 0.5 > Q_{3B} > Q_{3A} > Q_{4C} > Q_{1A} = Q_{1C} > Q_{3C}$, 其中 $Q_{2B} \sim Q_{4A}$ 点综合评价结果大于0.5,电能质量合格,剩余点电

能质量不合格。(注: Q_{2B} 表示 Q_2 点在情形 B 的评价结果)。

表 6 评价结果

Table 6 Evaluation results

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
情形 A	0.431 3	0.798 6	0.441 8	0.618 2
情形 B	0.705 2	0.872 8	0.481 6	0.716 1
情形 C	0.431 3	0.816 9	0.402 0	0.459 0

作为对比,采用传统的模糊综合评价方法,对上述监测数据进行了仿真实验。表 7 是本文所提出的最优隶属度法与传统模糊评价方法(①可变权重法^[14](后文简称方法①)和②改进隶属度法^[19](后文简称方法②))评价结果的对比。

表 7 评价结果对比

Table 7 Comparison of evaluation results

评估点	本文方法	方法①	方法②
Q_{1A}	0.431 3	不合格	合格
Q_{1B}	0.705 2	良	良
Q_{1C}	0.431 3	不合格	不合格
Q_{2A}	0.798 6	合格	合格
Q_{2B}	0.872 8	中	优
Q_{2C}	0.816 9	良	良
Q_{3A}	0.441 8	不合格	合格
Q_{3B}	0.481 6	中	中
Q_{3C}	0.402 0	不合格	合格
Q_{4A}	0.618 2	良	良
Q_{4B}	0.716 1	不合格	中
Q_{4C}	0.459 0	不合格	中

从表 7 可以看出:

(1) 本文提出的最优隶属度法的评价结果为数值形式,而传统评价方法的评价结果为等级形式。最优隶属度法的评价结果数值在 $[0, 1]$ 区间,以 0.5 为合格阈值,评价结果越接近 1,表示电能质量越好。评价结果更为简单直观。而且,如果需要进行定性分析时,只需要给出分级阈值,亦可快速判断。

(2) 最优隶属度法是依据指标偏离最优的程度来进行评价,更加符合电能质量评价特点,因此,评价结果准确率更高。如模糊方法①和②在 Q_{4B} 点和 Q_{1A} 点分别出现了误判。

(3) 最优隶属度法不需要对指标进行分级,而且,对不合格范围仍具有精细评价,并可以快速还原,追查不合格原因。

4 结语

本文对微电网的电能质量特点进行分析,借鉴模糊评价的思想,提出了基于最优隶属度的综合评

价方法,可以准确有效地对微电网各种运行情况下的电能质量进行评价。具有如下特点:①可以对微电网的电能质量进行定量的精细评价,隶属函数的设计更加符合电能质量评价的特点,准确率高;②对不合格范围内的电能质量仍能够进行有效和精细评价,并且能够快速还原不合格原因;③评价结果是连续化的数值形式,而不是等级形式,不会出现等级形式评价时两个电能质量相接近的点被分到不同等级的情况,也不会出现同一等级内部无法比较的问题。最后算例验证表明了本文方法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [2] 周龙,齐智平.微电网保护研究综述[J].电力系统保护与控制,2015,43(13):147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [3] 付超,廖仰凯,樊世通,等.风储海水淡化孤立微电网运行与控制实时仿真试验研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(14):41-47.
FU Chao, LIAO Yangkai, FAN Shitong, et al. Real-time simulation test and research of operation and control of isolated microgrid including wind power, storage and seawater desalination load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 41-47.
- [4] 谢林,谢开贵,何坚,等.计及控制策略的并网型微电网可靠性评估[J].电力系统保护与控制,2013,41(15):102-109.
XIE Lin, XIE Kaigui, HE Jian, et al. Reliability evaluation of grid-connected micro-grid considering control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 102-109.
- [5] 郭思琪,袁越,张新松,等.多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J].电工技术学报,2014,29(2):122-129.
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129.
- [6] Q/GDW 480-2010 分布式电源接入电网技术规定[S].北京:中国电力出版社,2014.
Q/GDW 480-2010 technical rule for distributed resources

- connected to power grid[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [7] 刘颖英, 李国栋, 顾强, 等. 基于径向基函数神经网络的电能质量综合评价[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 45-48. LIU Yingying, LI Guodong, GU Qiang, et al. The comprehensive evaluation of power quality based on the RBF neural network[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(1): 45-48.
- [8] 刘颖英, 徐永海, 肖湘宁. 地区电网电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 130-136. LIU Yingying, XU Yonghai, XIAO Xiangning. Analysis of new method on power quality comprehensive evaluation for regional grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 130-136.
- [9] 苏浩益, 李如琦, 唐林权, 等. 基于灰靶理论的电气化铁道电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 78-82. SU Haoyi, LI Ruqi, TANG Linquan, et al. Synthetic evaluation of power quality for electrified railway based on grey target theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 78-82.
- [10] 荆朝霞, 胡仁. 电能质量评估灵敏度分析及在改进密切值法中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 60-66. JING Zhaoxia, HU Ren. Sensitivity analysis for power quality evaluation and its application in modified close value method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 60-66.
- [11] 江辉, 彭建春, 欧亚平, 等. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 66-70. JIANG Hui, PENG Jianchun, OU Yaping, et al. Power and evaluation quality unitary quantification based on probability and vector algebra[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2003, 30(1): 66-70.
- [12] 李正明, 施诗, 潘天红, 等. 基于灰色关联度和理想解法的电能质量综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 14-19. LI Zhengming, SHI Shi, PAN Tianhong, et al. A synthetic power quality assessment based on grey correlation analysis and TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 14-19.
- [13] DING Zejun, YUAN Jinjing, HUANG Ruiyi, et al. Research of fuzzy synthetic evaluation method of power quality based on improved membership function[C] // Power Engineering and Automation Conference, Sept. 18-20, 2012, Wuhan: China Southern Power Grid Co., Ltd., 2012.
- [14] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳, 等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-16. ZHAO Xia, ZHAO Chengyong, JIA Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 11-16.
- [15] 李连结, 姚建刚, 龙立波, 等. 组合赋权法在电能质量模糊综合评价中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 56-60. LI Lianjie, YAO Jiangang, LONG Libo, et al. Application of combination weighing method in fuzzy synthetic evaluation of power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 56-60.
- [16] 杨纶标, 高英仪, 凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2011. YANG Lunbiao, GAO Yingyi, LING Weixin. Principle and application of fuzzy mathematics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2011.
- [17] 李军, 李继光, 姚建刚, 等. 属性识别和 G1-熵权法在电能质量评价中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 56-61. LI Jun, LI Jiguang, YAO Jiangang, et al. Application of attribute recognition and G1-entropy method in evaluation of power quality[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 56-61.
- [18] 胡永宏, 贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [19] 蒋金良, 袁金晶, 欧阳森. 基于改进隶属度函数的电能质量模糊综合评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 107-112. JIANG Jinliang, YUAN Jinjing, OUYANG Sen. Fuzzy comprehensive evaluation of power quality based on improved membership function[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(11): 107-112.

收稿日期: 2015-09-23; 修回日期: 2015-11-23

作者简介:

曾君(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为微电网能量管理及优化, 可再生能源发电系统中的电力电子及控制技术; E-mail: junzeng@scut.edu.cn

徐冬冬(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量、微电网能量管理及优化; E-mail: 996295384@qq.com

郭华芳(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为能源利用和转化过程的优化与控制。E-mail: guohf@ms.giec.ac.cn

(编辑 魏小丽)